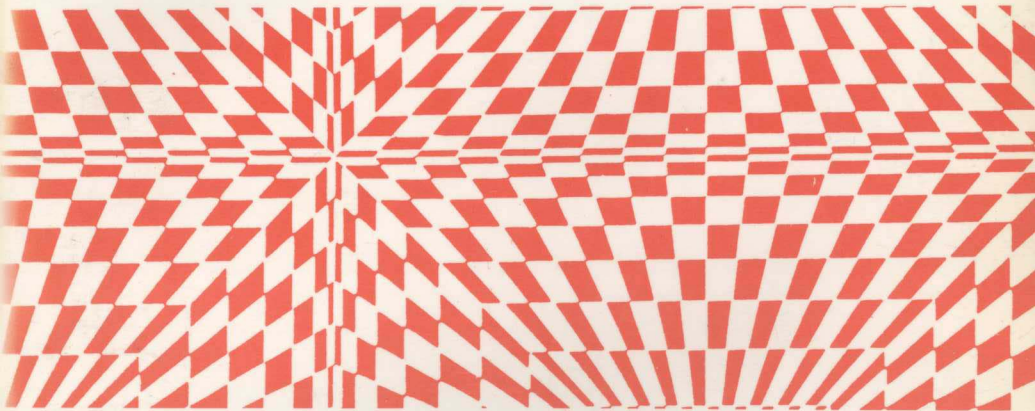


电路分析

王贻月 主编
邵春亮 主审

上册



大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

内 容 提 要

本书是在总结多年教学经验的基础上,于 1992 年形成了教学讲义,经过无线电技术、自动控制、工业自动化和化工自动化专业等四届学生的试用后编成本教材。

全书共分十五章。第一章至第四章为直流电路分析;第五章至第十章为交流电路分析;第十一章为双口网络;第十二章为动态电路时域分析;第十三章为动态电路频域分析;第十四章为状态变量法;第十五章为非线性电路分析。每章都配有例题和习题,书末并附有部分习题答案。

本书可供无线电技术、工业自动化、化工自动化、计算机、机电一体化等专业使用,也可供有关科技人员参考。

电 路 分 析

Dianlu Fenxi

(上册)

王貽月 主编

邵春亮 主审

大连理工大学出版社出版发行

(邮政编码:116024)

大连海事大学印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:7.5 字数:194 千字

1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—3100 册

责任编辑:习文

责任校对:邓玉萍

封面设计:孙宝福

ISBN 7-5611-1028-6

TM · 9

定价(上、下册):16.50 元

前 言

《电路分析》是电类专业的一本专业基础课教材。此书是在总结多年教学经验的基础上,吸取同类教材的精华,首先写成了教学讲义。从1992年开始在教学中试用,1994年又根据国家教委当年颁发的“电路课的基本要求”进行了修改,1995年与大连大学、大连轻工业学院、大连水产学院、大连工人大学等院校,在讲义的基础上共同编写成此教材。

本书考虑了电路课程改革的需要,内容上,在保证“基本要求”和高起点的原则下,讲述方法和语言表达力求精练,既注意适应各层次的学生,又给教师留下在课堂上发挥的余地,并与其它课程在内容和时序配合上做了一定安排。为此讲解顺序是先讲直流电路和正弦稳态电路,然后再讲动态电路,把网络图论和双口网络紧接在正弦稳态电路之后。在动态电路部分,把一阶电路和二阶电路并为一章,时域分析中对二阶电路着重定性分析,二阶电路的计算着重放在频域分析部分。

本书插图一律采取新的国标符号(GB 312—64),计量单位采用国际单位制(SI)。书中带“*”号的章节可供选用。

每章后面都附有习题,以供布置作业和练习内容之用,每册书末都附有部分习题答案以供参考。

每册后面还附有参考文献,可供教师和学生查阅课外资料用。

本教材可在88~120学时内讲授使用。

在教材的编写中,各编委成员承担的任务如下:第一、三、四章由大连理工大学的邵春亮编写;第二章由大连工人大学的厉鸿鸣编写;第五、六、七、十章由大连理工大学的王贻月和于明珍编写;第八章由大连理工大学的董维杰编写;第九章由大连轻工业学院

的秦伟编写；第十一章和第十五章由大连理工大学的陈宝庄编写；第十二章由大连理工大学的司媛春编写；第十三章和第十四章由大连理工大学的王更娜编写；附录 A 由大连大学的闵清秋编写；附录 B 由大连水产学院的孙丽贤编写；全书的统稿工作由王贻月主持。

大连理工大学的邵春亮教授对本书做了仔细审校。

在本书的编写工作中，高等学校工科电工课程教学指导委员会委员万金良教授给予了很多支持，在此表示衷心感谢。

由于水平所限，书中错误和不足之处在所难免，希广大读者批评指正。

编 者

1995 年 4 月

目 录

第一章 电路和电路定律	1
§ 1-1 电路及电路模型	1
§ 1-2 电路分析中的基本物理量	4
§ 1-3 电阻元件及其含源支路的特性方程	10
§ 1-4 电容元件	15
§ 1-5 电感元件	18
§ 1-6 独立电源	22
§ 1-7 受控源	25
§ 1-8 基尔霍夫定律	27
习题一	31
第二章 线性电阻网络的等效变换	41
§ 2-1 引言	41
§ 2-2 电阻串并联网络的等效变换	42
§ 2-3 电阻的星形和三角形网络的等效变换	47
§ 2-4 电源模型简化与等值变换	51
习题二	55
第三章 线性电路的基本分析方法	62
§ 3-1 支路电流法	62
§ 3-2 网孔法和回路法	65
§ 3-3 节点分析法	73
习题三	78
第四章 线性网络定理	84
§ 4-1 叠加定理	84
§ 4-2 互易定理	89

§ 4-3 替代定理	93
§ 4-4 戴维南定理与诺顿定理	94
§ 4-5 最大功率传递定理	106
§ 4-6 对偶原理	108
习题四	110
第五章 正弦电流电路	121
§ 5-1 正弦量的三要素及有效值	121
§ 5-2 相量法的基本概念	124
§ 5-3 相量形式的电路定律	128
§ 5-4 阻抗、导纳、相量图	131
§ 5-5 正弦电流电路的功率、功率因数	134
§ 5-6 最大功率传输条件	139
§ 5-7 正弦交流电路的稳态计算	141
习题五	144
第六章 电路的谐振	148
§ 6-1 正弦交流电路的串联谐振	148
§ 6-2 串联谐振电路的谐振曲线和选择性	150
§ 6-3 正弦交流电路的并联谐振	153
§ 6-4 串并联谐振电路	156
习题六	157
第七章 耦合电感和理想变压器	160
§ 7-1 耦合电感的伏安关系	160
§ 7-2 耦合电感电路的分析计算	162
§ 7-3 耦合电感的去耦等效电路	163
§ 7-4 空芯变压器电路分析	167
§ 7-5 理想变压器	170
§ 7-6 一般变压器的模型	173
习题七	176
第八章 三相电路	180

§ 8-1 三相电路概述	180
§ 8-2 对称三相电路的分析与计算	186
§ 8-3 不对称三相电路	193
§ 8-4 三相电路的功率	198
习题八	202
第九章 非正弦周期电流电路	205
§ 9-1 非正弦周期电流	205
§ 9-2 周期函数分解为傅里叶级数	205
§ 9-3 有效值、平均值和平均功率	212
§ 9-4 非正弦周期电流电路的计算	214
习题九	218
习题答案	221
参考文献	232

第一章 电路和电路定律

本章介绍电路模型和理想电路元件,包括电阻、独立电源和受控电源。引入了电源、电压的参考方向的概念。

基尔霍夫定律是集总电路的基本定律,它包括电流定律(KCL)和电压定律(KVL),它与构成电路的元件的性质无关。

§ 1-1 电路及电路模型

一、电路

电流流经路径叫电路。一个电池、一个灯泡、一个开关、三根连接导线,按着图 1-1 的方式连接起来,组成了一个简单的实际电路。由此可对电路定义如下:若干电气设备或器件,按照一定的方式连接起来,构成电流的通路,这个通路称为电路或称为网络。电路和网络两个词的意义相近,有时混用。

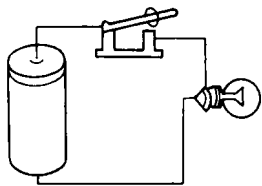


图 1-1 电路的组成

二、电路的形式与功能

电在日常生活、工农业生产、科学研究以及国防等各个方面都有广泛的应用。在无线电技术、自动控制、计算机等各方面电子技术领域,采用长达数百里的通讯线路,或只集中在几平方毫米内的集成电路,来完成各种各样的任务。电路的作用大致可分为:

1. 提供能量。例如供电电路;
2. 传送或处理信号。例如电话线路、放大器电路;

3. 测量电路。例如万用表电路；
4. 存贮信息。例如计算机的存贮器电路，存放数据、程序。

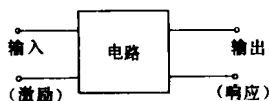


图 1-2 电路激励与响应

上述电路中，电源或信号源的电压或电流对电路的输入推动电路工作，故称为激励；终端的电压或电流是电路的输出，又称为响应。于是电路的功能也可用图 1-2 所示框图表示。

三、实际电路元件

构成电路的设备和器件，称为实际电路元件，其中提供电能的设备统称为电源。如电池、发电机、信号发生器；吸收电能的设备称为负载，如各种电阻器、电感线圈、电容器、晶体管等。

人们设计制做某种器件是要利用它的主要物理性质，譬如制造一个电阻器是要利用它的电阻、即对电流呈现阻力的性质；制做一个电源是要利用它正负极间能保持有一定电压的性质；制做连接导线是利用它的优良导电性能，使电流顺利流过。但事实上，不可能制造只表现出主要性质的部件，也就是说，不可能制造出理想的器件。一个实际的电阻器有电流流过时，还会产生磁场，因而还兼有电感的性质；一个实际电源总有内阻，因而在使用时不可能总保持一定的端电压；连接导线总有一点电阻甚至还有电感。这样就往往给电路分析带来困难。因此，我们必须在一定的条件下对实际器件加以理想化，忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要性质模型(model)来表示。如图 1-1 中灯泡的电感是极其微小的，把它看作一个理想电阻元件是完全可以的；一个新的干电池，内阻与灯泡电阻相比可以忽略不计，把它看成一个电压恒定的理想电压源也是完全可以的；连接导线短的情况下，它的电阻完全可以忽略不计，可看作为理想导体。于是，理想电阻元件就构成了灯泡模型，理想电压源就构成了干电池的模型，而理想导体就构成了连接导线的模型。为此，我们要设法从实际电路元件中抽象出一些理想的电

路元件来,并用这些理想元件去构成实际元件的模型,而后,再分析模型中出现的电磁现象。

四、理想电路元件

只显示单一电磁现象的电路元件,称为理想电路元件,或叫做集总参数元件。理想电路元件有:

1. 理想的电源元件:独立电压源与独立电流源。
2. 理想的负载元件:用以表征电磁能量转换为其它形式能量的电阻器、表征电场现象的电容器以及表征磁场现象的电感器。
3. 理想的耦合元件:受控电源、耦合电感器、理想变压器、回转器等。

上述理想的电路元件都有精确的数学定义,关于它们的定义、性质,后续各章将依次介绍。

五、电路模型

用一个或几个理想电路元件构成的模型去模拟一个实际电路,使得模型中出现的电磁现象与实际电路中反映出来的现象十分近似。这个理想电路元件组成的电路称为电路模型。理想电路元件也叫集总参数元件,所以电路模型也叫做集总参数电路。又因为理想电路元件都有精确的数学定义。所以,电路模型也可叫做数学模型。

今后分析的电路都是电路模型,模型中的元件都是理想的,值得注意的是模型中所得结果只是实际电路的一种近似。

需指出,当实际电路尺寸远小于电路中电流的波长时,该电路可用集总参数模型模拟;当电路尺寸与波长有相同数量级时,该电路就要用分布参数模型模拟了。

本课程主要任务:学习电路分析,所谓电路分析,就是在已知电路结构、元件参数的情况下,计算电路激励与响应之间的定量关系;分析电路在实现其功能的过程中的各种现象、状态及性能。

§ 1-2 电路分析中的基本物理量

一、电流

1. 定义和实际方向

单位时间内通过导体横截面的电荷量称为电流,以 $i(t)$ 表示,即

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

$i(t)$ 表示电流为 t 的函数。人们规定正电荷运动的方向作为电流的实际方向。

2. 时变电流与时变电流电路

若电流的方向随时间 t 改变或大小是 t 的函数,这样的电流称为时变电流,以 $i(t)$ 表示。

通有时变电流的电路,称为时变电流电路。

3. 直流电流与直流电路

若电流的大小恒值,方向不变,这样的电流称为直流电流(direct current,简称 dc 或 DC)或恒定电流,用字母 I 表示。

通有直流电流的电路,称为直流电路,或恒定电流电路。

4. 电流的单位在国际单位制(SI)中,电量的单位为库仑(coulomb,简写 C),时间单位为秒(second,简写 s),电流单位为安培(ampere,简写 A),关系式为

$$1 \text{ 安培(A)} = \frac{1 \text{ 库仑(C)}}{1 \text{ 秒(s)}}$$

此外,电流常用的单位还有千安、毫安、微安及纳安等,且有

$$1 \text{ 千安(kA)} = 10^3 \text{ 安(A)}.$$

$$1 \text{ 毫安(mA)} = 10^{-3} \text{ 安(A)}.$$

$$1 \text{ 微安}(\mu\text{A}) = 10^{-6} \text{ 安(A)}.$$

$$1 \text{ 纳安(nA)} = 10^{-9} \text{ 安(A)}.$$

5. 电流的参考方向

在电路分析中,要知道电流的方向后才能着手分析电路。但是,电路中的电流方向通常事先是不知道的,对此,可在每段电路中先任意地指定一个电流方向,这个任意指定的电流方向,称为电流的参考方向,以箭头符号表示,如同数学分析中坐标系的正方向。当电流的实际方向与参考方向相符时,此电流为正值;相反时,定为负值,如图 1-3(a)中电流为正、图 1-3(b)中电流为负。另一方面

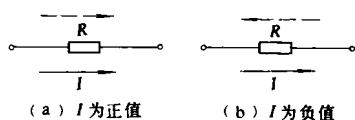


图 1-3 电流的参考方向(实线箭头为参考方向,虚线箭头为实际方向)

因参考方向不同,同一电流有两种不同的表示法,如实际由电阻左端流向右端、电流强度为 3A 的电流,可用图 1-4 的两种表示法。在未选定参考方向之前,讨论电流的正负是没有意义的,只有电流的参考方向选定之后,才能按着实际方向与参考方向是否相同而确定电流的正、负值或根据电流的正、负值确定电流的实际方向。

今后在电路图中,用实线箭头注出的电流方向都是指参考方向。参考方向一经选定,在计算过程中不能随意更改。

参考方向又称假定正方向,

简称正方向。

二、电位

在电路中选取一点作为参考点(参考点电位一般定为零),

则其余各点对参考点来讲都有电位,在直流电路中,库仑电场力移动单位正电荷从 a 点到参考 o 点所做功的大小,定义为 a 点的电位值,以 U_a 表示。

电位的单位为伏特(Volt,简写 V)。常用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等。

在电路分析中,按习惯,指定参考点为“-”极性(在电子线路

面因参考方向不同,同一电流有两种不同的表示法,如实际由电阻左端流向右端、电流强度为 3A 的电流,可用图 1-4 的两种表示法。在未选定参考方向之前,讨论电流的正负是没有意义的,

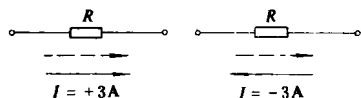


图 1-4 同一电流两种表示法

中,有时指定参考点为“+”极性),其余各点均为“+”极性,这种指定的极性为电位的参考极性。

“+”极性表示高电位端。据电位的参考极性,及计算值的正负,就能确定各点电位的高与低。

电位是一个相对物理量,即各点电位的极性和大小与所选取的参考点有关。参考点不同各点电位相应不同,但参考点一经选定,则该电路中各点电位就唯一确定了,即电位具有单值性。不指定参考点,讨论电位是没有意义的。

参考点电位常规定为零,所以参考点又叫零电位点。原则上零电位点可任意选定,但习惯上取大地为零电位点。这是因为大地容纳电荷的能力很大,它的电位很稳定,不会因为局部电荷量的变化而影响大地电位的高低。电子线路中常取公共点或机壳作为电位的参考点。对于某些设备,虽然不需接地,但在分析时,为了方便起见,可以把它们之中元件汇集的公共端点规定为零电位点。

电位虽然是对某一点而言,但实质上还是指两点间的电位之差,只是其中一个参考点电位预先指定为零而已。

三、电压

1. 定义与参考极性

在直流电路中,若 a 点电位为 U_a , b 点电位为 U_b ,则定义 $U_{ab}=U_a-U_b$ 为 a 、 b 两点间电压,或称做 ab 间的电位差、电位降、电压降。

在直流电路中, U_a 、 U_b 值恒定,所以 U_{ab} 也为恒定值。这样, U_{ab} 亦称恒定电压,或直流电压(以下称电压),其下标 ab 表示电位自 a 点到 b 点是降低的。

若 $U_a=3V$, $U_b=1V$,则有 $U_{ab}=U_a-U_b=3-1=2V$,表明从 a 点到 b 点电位降低了 $2V$,即从 b 点到 a 点电位降低了 $-2V$ 。

电压单位与电位单位相同,即伏特(V)。

在分析电路中两点间的电压时,先要假定这两点电压的极性,可以任意假定,这个假定极性称为电压的参考极性。我们采用

“+”表示极性高电位，“-”表示极性低电位。有了电压的参考极性 & 计算值的正负，两点间电位的高低就能确定了。

电路分析中，离开了电压的参考极性谈论电压的正与负也是没有意义的。电压的“参考极性”与“参考方向”这两个术语涵义是等同的，可以混用。

2. 电压 U_{ab} 的物理涵义

在恒定电流电路中，库仑电场力移动单位正电荷从一点到另一点所做的功，只与两点的位置有关，而与移动电荷的路径无关。这样，在图 1-5 中，从 $a \rightarrow 0$ (零电位点) 电场力移动单位正电荷所做的功为：

$$U_a = U_{a0} (\text{从 } a \rightarrow 0 \text{ 所做的功}) + U_{b0} (\text{从 } b \rightarrow 0 \text{ 所做的功})$$

由此得 $U_a - U_b = U_{ab}$ (由 $a \rightarrow b$ 所做的功)

表明库仑电场力移动单位正电荷从 $a \rightarrow b$ 所作功的大小，就是 ab 间电压 U_{ab} 的值。

3. 关联方向

电流、电压的参考方向都是可以任意指定的，今后为了分析上的方便，我们经常选取一致的参考方向，即所谓关联参考方向，如图 1-6 所示。这样一来，在关联方向下，当画出电流的参考方向后，就不用再画出电压参考方向。

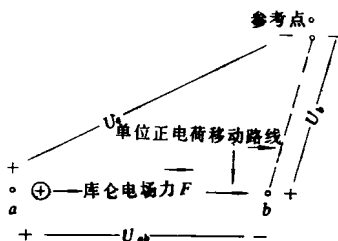


图 1-5 U_{ab} 含义的示意图

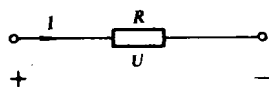


图 1-6 I, U 为关联参考方向

须强调指出，在今后的电路分析中，谈到关联参考方向时，一

般都要讲清楚关于哪一部分电路关联。

四、直流电源电势的定义

在直流电源内部,非库仑电场力移动单位正电荷从负极到正极所做功的大小,定义为该电源的电势,以 E 表示。

非库仑电场力做功,使电位升高,所以电势 E 表示自负极到正极的电位升。

电势的单位也为伏特。

五、直流电能量的计算

一段直流电路如图 1-6 所示,图中 U 、 I 有关联方向。正电荷 Q 受库仑电场力 F 作用自 a 端移到 b 端,根据电压涵义,库仑电场力所做功为

$$W = QU$$

在直流电路中有

$$Q = It$$

由此得

$$W = UI t$$

式中时间 t 总是正的,但 U 和 I 可以是正值,也可以是负值,因为它们都是据参考方向计算出来的。这样算出的功就会出现两种情况,即 $W > 0$ 或 $W < 0$ 。在 $W > 0$ 时,表明库仑电场力做正功。库仑电场做正功使电场能量减少,这减少的能量被 ab 这段电路所吸收(或消耗);反之,在 $W < 0$ 时,表明库仑电场力做负功,实际上是非库仑电场力做正功,它使电场能量增加,亦即 ab 这段电路产生能量。综上所述,可得下述结论:一段电路的端电压为 U ,入端电流为 I ,在关联参考方向下,在时间 t 内,有

$$W = UI t \begin{cases} > 0 \text{ 该段电路吸收正电能(即产生负电能)} \\ < 0 \text{ 该段电路吸收负电能(即产生正电能)} \end{cases}$$

当 U 、 I 有非关联方向时,能量吸收、产生判断规则与上述相反。在做功的计算式中电压单位为伏特(V),电流单位为安培(A),时间单位为秒(s),做功即电能单位为焦耳(Joule,简称为 J)。

工业上能量的单位用“度”。

$$1 \text{ 度电} = 1 \text{ 千瓦小时(kW} \cdot \text{h)}$$

六、电功率

1. 定义

单位时间内吸收(或产生)的电能量,称为电功率,简称功率。

2. 直流电路功率的计算

直流功率以 P 表示,按功率定义则有

$$P = UI$$

与上述电能量的计算相仿,可得下述结论:一段电路的端电压为 U ,端电流为 I ,在关联参考方向下,有

$$P = UI \begin{cases} > 0 \text{ 该段电路吸收正功率(即产生负功率)} \\ < 0 \text{ 该段电路吸收负功率(即产生正功率)} \end{cases}$$

在 UI 非关联方向时,功率吸收与产生的判断规则与上述相反。

电压单位为伏特(V),电流单位为安培(A),功率单位为瓦特(Watt,简写 W)。常用的单位还有毫瓦(mW)、千瓦(kW)与兆瓦(1MW=10⁶W)

顺便指出,以上各物理量,实际应用中有时感到单位太大或太小使用不便,我们便在这些单位前加表 1-1 所示的词头,用以表示这些单位被一个以 10 为底的正次幂或负次幂相乘后所得的辅助单位,例如:

$$1 \text{ 毫安(mA)} = 1 \times 10^{-3} \text{ 安(A)}$$

$$5 \text{ 微秒}(\mu\text{s}) = 5 \times 10^{-6} \text{ 秒(s)}$$

$$2 \text{ 千瓦(kW)} = 2 \times 10^3 \text{ 瓦(W)}$$

显然写成 1mA 要比写成为 $1 \times 10^{-3} \text{ A}$ 方便。这些词头是经常使用的,必须记住。按着“国际标准化组织”推荐的使用方法,不允许用两上以上国际制词头并列而成的组合词头。我国常用的“毫微”“微微”“千兆”等分别是由“毫”和“微”、“微”和“微”、“千”和“兆”并列而成的,与国际上采用的规则不符,应该分别用“纳”、“皮”、“吉”等代替如表 1-1 所示。

表 1-1

部分国际制词头

因 数	词头名称		符 号
	原 文	中 文	
10^{12}	tera	太	T
10^9	giga	吉	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳	n
10^{-12}	pico	皮	p

§ 1-3 电阻元件及其含源支路的特性方程

一、电阻元件

电阻元件是电路基本元件之一,它是从对电流呈现阻力的实际部件中抽象出来的模型。

一个实际电阻器通以电流后,会同时显示出热效应、磁场效应与电场效应,其中最主要的是热效应。当将其它次要效应都忽略时,则实际电阻器就成为理想化电阻器。

1. 理想电阻器的定义

如果一个二端元件在任一瞬间 t 的电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 两者之间关系由 $u-i$ 平面上一条曲线所决定,则此二端元件称为电阻元件。这条表示元件电压电流关系曲线称为元件的伏安特性曲线,简称伏安特性。不同的电阻元件有不同的伏安特性,但每一电阻元件只能由一条唯一的伏安特性来表征。

在电路模型中,电阻器的物理特性是用来表征电磁能量转化为其它形式能量的。电阻器上电压和电流同时存在,同时消失,即它